非ニュートン流動について

—スラリー輸送の基礎—

川 島 俊 夫*

On the Non-Newtonian Fluid Flow

Toshio KAWASHIMA

1. は じ め

1.1 円管路内流動

- 搬送流体(水)：比重量(γ), 粘性(μ)
- 粒子：粒度(ds), 粒度分布, 形状
比重(S), 親水性
- 輸送条件：管径(D), 流速(V_m), 濃度(C_v)
輸送距離(L), 管壁面粗さ(ϵ/D).

流動様式

搬 送 流 体	流 動 様 式	
ニュートン流体	均質流れ	非均質流れ
非ニュートン流体	均質流れ	非均質流れ

1.2 均質な非ニュートン流れ

- 時間依存性の有無(図1)
レオベクティック流れ, チクソトロピック流れ¹⁾
- せん断応力と速度勾配との関係(図2)

$$-\frac{du}{dr} = F(\tau) \quad (1)$$

○工学的立場

時間依存性の無い定常流れ

搬送流体：非ニュートン流れ

擬塑性流体, ビンガム流体

流動様式：均質流れ, 非均質流れ

○本稿の内容

流動様式の判別法, 臨界速度, 流動抵抗, 実施例

2. 流動様式の判別法

(均質な層流流れ)

2.1 細管法

- 釣合いの式：(図3)

$$2\pi RL\tau_w = \pi R^2 \Delta p$$

$$\tau_w = \frac{R \cdot \Delta p}{2L}, \quad \frac{\tau_w}{R} = \frac{r}{R} \quad (2)$$

- 流量：

図1

図2

* 東北大学工学部資源工学科教授
昭和54年8月29日受理

図 3

$$Q = \int_0^R 2\pi r u dr = \pi \int_0^R u d(r^2) = \pi \left\{ (ur^2)_0^R - \int_0^R r^2 du \right\}$$

$$r = \frac{\tau}{\tau_w} R, \quad du = -F(\tau) d\tau = -F(\tau) \frac{R}{\tau_w} d\tau$$

$$Q = \pi \left(\frac{R}{\tau_w} \right)^3 \int_0^{\tau_w} \tau^2 F(\tau) d\tau \quad (3)$$

○平均流速：

$$V_m = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{R}{\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} \tau^2 F(\tau) d\tau \quad (4)$$

○見掛け流動度：

$$\phi_a = \frac{8V_m L}{R^2 \Delta p} = \left(\frac{4V_m}{R} \right) \left(\frac{1}{\tau_w} \right) = \left(\frac{8V_m}{D} \right) / \left(\frac{D \Delta p}{4L} \right) \quad (5)$$

$$\phi_a = \frac{4}{\tau_w^4} \int_0^{\tau_w} \tau^2 F(\tau) d\tau \quad (6)$$

○ $F(\tau_w)$ と τ_w との関係曲線 (図 4, 図 5)

$$\frac{d\phi_a}{d\tau_w} = -\frac{4}{\tau_w} \phi_a + \frac{4}{\tau_w^2} F(\tau_w)$$

$$F(\tau_w) = \tau_w \left(\phi_a + \frac{1}{4} \frac{d\phi_a}{d \log_e \tau_w} \right) \quad (7)$$

2.2 簡易判別法 (両対数方眼紙上の $V_m \sim i$)

○擬塑性流体：流動特性 直線 ($\theta \leq 45^\circ$) (図 6)

$$-\frac{du}{dr} = \frac{1}{\mu_p} (\tau)^n \quad (8)$$

○ビンガム流体：流動特性 曲線 ($\theta \leq 45^\circ$) (図 7)

$$-\frac{du}{dr} = \frac{1}{\mu_B} (\tau - \tau_y) \quad (9)$$

図 4

図 5

2.3 ビンガム流体の比粘半径の求め方

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{32\mu_B V_m}{D^2 \phi_B} = \frac{4\tau_y}{D \cdot a} \quad (10)$$

$$\phi_B = 1 - \frac{4}{3}a + \frac{1}{3}a^4 \quad (11)$$

$$a = \frac{\tau_y}{\tau_w} = \frac{r_p}{R} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} &= \frac{a_1}{a_2} \\ \frac{Q_2}{Q_1} &= \frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} \cdot \frac{\phi_{B2}}{\phi_{B1}} = \frac{a_1}{a_2} \cdot \frac{\phi_{B2}}{\phi_{B1}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

(1) McMillen の試行法²⁾

a_1 を仮定。(13) 式より a_2 を求める。(11) 式より ϕ_{B2} を計算する。(13) 式より ϕ_{B1} がわかる。これから得られる a_1 が前に仮定した a_1 と同じになるまで試行する。

a がわかれば (10) 式より τ_y および μ_B が得られる。

(2) 川島・野田の図式法^{3), 4), 5)}

○共点法 (図 8)

$$\frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} \equiv \lambda, \quad \frac{\Delta p_1 \cdot Q_2}{\Delta p_2 \cdot Q_1} \equiv \kappa \quad (14)$$

$$a_1 = \lambda a_2, \quad \phi_{B2} = \kappa \phi_{B1}$$

図 6

図 7

$$\begin{aligned}\phi_{B_2} &= 1 - \frac{4}{3}a_2 + \frac{1}{3}a_2^4 = 1 - \frac{4}{3}\left(\frac{a_1}{\lambda}\right) \\ &+ \frac{1}{3}\left(\frac{a_1}{\lambda}\right)^4 = \kappa\phi_{B_1} \\ &= \kappa\left(1 - \frac{4}{3}a_1 + \frac{1}{3}a_1^4\right) \\ \kappa &= \frac{1 - \frac{4}{3}\left(\frac{a_1}{\lambda}\right) + \frac{1}{3}\left(\frac{a_1}{\lambda}\right)^4}{1 - \frac{4}{3}a_1 + \frac{1}{3}a_1^4}\end{aligned}\quad (15)$$

○共線法 (図 9)

$$\begin{aligned}a^4 - \frac{4\left(\kappa - \frac{1}{\lambda}\right)}{\kappa - \frac{1}{\lambda^4}}a + \frac{3(\kappa - 1)}{\kappa - \frac{1}{\lambda^4}} &= 0 \\ y_1 &= a^4 \\ y_2 &= \frac{4\left(\kappa - \frac{1}{\lambda}\right)}{\kappa - \frac{1}{\lambda^4}}a - \frac{3(\kappa - 1)}{\kappa - \frac{1}{\lambda^4}}\end{aligned}\quad (16)$$

いずれも、 λ, κ がわかれば a が図式的に求められる。

(3) 川島・益山の微分法⁶⁾ (図10, 図11)

図 8

図 9

流速 V_m と圧力損失 $\Delta p(i)$ とを両対数方眼紙にとる。

$$\begin{aligned}\tan \theta &= \lim_{\substack{\Delta i \rightarrow 0 \\ \Delta V_m \rightarrow 0}} \frac{\log(i + \Delta i) - \log i}{\log(V_m + \Delta V_m) - \log V_m} \\ &= \lim_{\substack{\Delta p \rightarrow 0 \\ \Delta V_m \rightarrow 0}} \frac{\log \frac{p + \Delta p}{p}}{\log \frac{V_m + \Delta V_m}{V_m}} \\ \tan \theta &= \frac{1}{1 + \frac{4a(1-a^3)}{3+a^4-4a}}\end{aligned}\quad (17)$$

$i \sim V_m$ の実験結果から、この曲線の任意の点の勾配を知ることによって比栓半径が求められる。
以上、3つの方法には大きな差異は認められないが、

図10

図11

微分法は簡便法といえるであろう。

3. 円管路内流れの臨界レイノルズ数

3.1 Hanks の考え方^{7), 8)}

流体の慣性力の値が粘性力のある倍数以上の値になったとき流体は不安定となり、層流流れではなくなるとしている。

局所流れ安定係数: K

$$K = \frac{\rho}{2} \frac{|\text{grad}(VV)|}{|F - \text{grad } p|} \quad (18)$$

K がある値以上になったとき乱れが発生する。

3.2 益山・川島の考え方⁹⁾

流れ全体と管路断面形状を考慮し、局所流れ安定係数 K の管路断面の平均値をもって安定係数 Z を定義した。

$$Z = \frac{\int_s |K| dS}{\int_s dS} \quad (19)$$

非ニュートン流体においても慣性力と粘性力との比がある値以上になったとき流れの状態が変化する。

図12

(1) ニュートン流体

$$K = \frac{1}{2} N_{ReN} \xi (1 - \xi^2) \quad (20)$$

$$\xi = r/R, \quad N_{ReN} = \rho D V_m / \mu$$

$$Z = \frac{\int_0^1 \frac{1}{2} N_{ReN} \xi^2 (1 - \xi^2) d\xi}{\int_0^1 \xi d\xi} = \frac{2}{15} N_{ReN} \quad (21)$$

$$N_{ReNC} = 2,100 \quad Z_c = 280 \quad (22)$$

(2) 擬塑性流体 (図12)

$$K = N_{ReP} \frac{(3n+1)^2}{16n(n+1)} \xi^{1/n} (1 - \xi^{n+1/n}) \quad (23)$$

$$N_{ReP} = \rho D^n V_m^{2-n} / [\mu_P \{(3n+1)/4n\}^n 8^{n-1}] \quad (24)$$

$$Z = N_{ReP} \frac{(3n+1)^2}{8(2n+1)(3n+2)} \quad (25)$$

$$Z_c = 280$$

図13

$$N_{RePC} = \frac{2240(2n+1)(3n+2)}{(3n+1)^2} \quad (26)$$

(3) ビンガム流体 (図13)

$$0 \leq \xi \leq a \quad K=0$$

$$a \leq \xi \leq 1$$

$$K = \frac{N_{ReB}}{2\left(1 - \frac{4}{3}a + \frac{1}{3}a^4\right)} (\xi - a)(1 - 2a + 2a\xi - \xi^2) \quad (27)$$

$$N_{ReB} = \frac{\rho D V_m}{\mu_B}, \quad a = \frac{\tau_y}{\tau_w} = \frac{r_p}{R} \quad (28)$$

$$Z = N_{ReB} = \frac{(1-a)^4(8+7a)}{60\left(1 - \frac{4}{3}a + \frac{1}{3}a^4\right)} \quad (29)$$

$Z_c=280$ を用いると N_{ReB} は次のようになる。

$$N_{ReBC} = \frac{16800\left(1 - \frac{4}{3}a_c + \frac{1}{3}a_c^4\right)}{(1-a_c)^4(8+7a_c)} \quad (30)$$

$$N_{He} = \frac{\rho \tau_y D^2}{\mu_B^2} = \frac{8a}{1 - \frac{4}{3}a + \frac{1}{3}a^4} N_{ReB} \quad (31)$$

$$N_{He} = \frac{134400a_c}{(1-a_c)^4(8+7a_c)} \quad (32)$$

N_{He} がわかれば a_c 、従って (30) 式より N_{ReBC} がわかる。

4. 均質流れの流動抵抗

4.1 擬塑性流体

擬塑性流体に対して、乱流流れにおいて混合長概念を適用する。

$$\tau = \mu_p \left(-\frac{du}{dr} \right)^n + \rho l^2 \left(-\frac{du}{dr} \right)^2 \quad (33)$$

Metzner¹⁰⁾ によるレイノルズ数を用いる。

$$N_{ReB} = \frac{\rho V_m^{2-n} D^n}{\mu_p} \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n 8^{1-n} \quad (34)$$

$$= 8a \left(\frac{n}{3n+1} \right)^n \left\{ \int_0^1 X^2 G(X, L^+, a, n) dX \right\}^{2-n} \quad (35)$$

Fanning による管摩擦係数を用いる。

$$f_p = \frac{2u^{*2}}{V_m^2} = 2 \left\{ \int_0^1 X^2 G(X, L^+, a, n) dX \right\}^2 \quad (36)$$

ここに、

$$X = r/R, \quad u^* = \sqrt{\tau_w/\rho}, \quad L^+ = l/R$$

$$a = \frac{\rho U^{*2-n} R^n}{\mu_p}$$

流動抵抗を表わすものとして、 $f \sim N_{ReP}$ の関係を求めるため、混合長を新たに提示する。

混合長に対する従来の提示。

Nikuradse¹¹⁾:

Vol. 27, No. 1 ('80—春)

$$\frac{l}{R} = 0.14 - 0.08 \left(1 - \frac{\gamma}{R} \right)^2 - 0.06 \left(1 - \frac{\gamma}{R} \right)^4 \quad (37)$$

Prandtl¹²⁾;

$$l = k\gamma, \quad k = 0.4 \quad (38)$$

van Driest¹³⁾;

$$l = 0.4\gamma \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{\gamma}{R} \frac{a}{26} \right) \right\} \quad (39)$$

Hanks¹⁴⁾;

$$\frac{l}{R} = 0.36 \frac{\gamma}{R} \left[1 - \exp \left\{ -\frac{\gamma}{R} \frac{a^{1/n} \left\{ 1 - \left(\frac{a_c}{a} \right)^{1/n} \right\}}{22B(n)} \right\} \right] \quad (40)$$

$$B(n) = \frac{1}{n}$$

a_c : Hanks による臨界レイノルズ数における α の値

混合・長に対する益山・川島の提示¹⁵⁾。

$$\frac{l}{R} = L^+ = 0.4 \frac{\gamma}{R} \exp \left(-\frac{\gamma}{R} \right)$$

$$\times \left[1 - \exp \left\{ -\frac{\gamma}{R} \frac{a^{1/n} \left\{ 1 - \left(\frac{a_c}{a} \right)^2 \right\}}{26B(n)} \right\} \right] \quad (41)$$

$$B(n) = 1/n$$

$$a_c = \left\{ \frac{280(2n+1)(3n+2)}{n} \right\}^{n/2} \quad (42)$$

数値解析および実験結果との比較¹⁶⁾

ニュートン流体に対する検証 (図14, 図15, 図16)

擬塑性流体に対する検証および設計線図

(図17, 図18, 図19)

4.2 ビンガム流体

ビンガム流体に対して、乱流流れにおいて混合長概念を適用する¹⁷⁾。

$$\tau = \tau_y + \mu_B \left(-\frac{du}{dr} \right) + \rho l^2 \left(-\frac{du}{dr} \right)^2, \quad \tau > \tau_y \quad (43)$$

図14

図15

$$\left(-\frac{du^+}{dX}\right) = \frac{2(X-a)a}{1+\sqrt{1+4a^2L^+(X-a)}} = a \cdot G(X \cdot a \cdot L^+) \quad (44)$$

$$a < X \leq 1$$

ここに,

$$X = r/R, \quad a = \tau_y/\tau_w, \quad u^+ = u/u^*, \quad u^* = \sqrt{\tau_w/\rho},$$

$$L^+ = l/R, \quad \alpha = \rho u^* R / \mu_B,$$

$$NR_{\theta B} = \frac{\rho V_m D}{\mu_B} = 2a^2 \int_a^1 X^2 G(X \cdot a \cdot L^+) dX \quad (45)$$

$$f = \frac{2u^{*2}}{V_m^2} = 2/\alpha^2 \int_a^1 X^2 G(X \cdot a \cdot L^+) dX \quad (46)$$

混合長に対する従来の提示。

van Driest¹⁸⁾;

$$l = 0.4\gamma \left\{ 1 - \exp\left(1 - \frac{\gamma}{R} \frac{a}{26}\right) \right\} \quad (39)$$

Hanks¹⁹⁾, 20)

図16

図17

図18

図19

$$\frac{l}{R} = 0.36 \frac{\gamma}{R} \left[1 - \exp\left\{ -\frac{\gamma}{R} \frac{a \left\{ 1 - \left(\frac{a_c}{a} \right) \right\}}{22B(N_{He})} \right\} \right] \quad (47)$$

$$B(N_{He}) = 1 + \frac{0.00352N_{He}}{1 + 0.000504N_{He}^2}$$

混合長に対する益山・川島らの提示²¹⁾。

$$\frac{l}{R} = L^+ = 0.4 \frac{\gamma}{R} \exp\left(-\frac{\gamma}{R}\right) \times \left[1 - \exp\left\{ -\frac{\gamma}{R} \frac{\alpha \sqrt{1-a} \left\{ 1 - \left(\frac{a_c}{a} \right)^2 \right\}}{26B(N_{He})} \right\} \right] \quad (48)$$

$$B(N_{He}) = \frac{\rho \tau_y D^2}{\mu_B^2} = 1 + \frac{0.14N_{He}^{1/4}}{1 + 0.005N_{He}^{1/2}} \quad (49)$$

$$a_c = \left\{ \frac{33600}{(1-a_c)^4(8+7a_c)} \right\}^{1/2} \quad (50)$$

$$N_{He} = \frac{134400a_c}{(1-a_c)^4(8+7a_c)} \quad (32)$$

数値解析および実験結果との比較(図20, 図21, 図22)

図20

図21

図22

流動抵抗に関する設計線図 (図23)

5. 非均質流れの流動抵抗

5.1 ニュートン流体

(1) 水力勾配 i および圧力損失係数 ϕ_c ²²⁾

$$i = i_w (1 + C_v \phi_c) \quad (51)$$

$$\phi_c = \frac{i - i_w}{i_w C_v} \sim F_r = \frac{V_m}{\sqrt{gD}} \quad (52)$$

$$\phi_c = K_D \psi^{-n} \quad (\text{図24}) \quad (53)$$

$$\psi = \frac{V_m^2 \sqrt{C_D}}{gD(S-1)} \quad (54)$$

Condolios ²³⁾	: $K_D=180$	$n=1.5$
Koch ²⁴⁾ , Babcock ²⁵⁾	: $K_D=81$	$n=1.5$
Bonnington ²⁶⁾	: $K_D=150$	$n=1.5$
Ellis ²⁷⁾	: $K_D=385$	$n=1.5$
Zandi ²⁸⁾	: $K_D=6.3$	$n=0.354$ ($\psi > 10$)
//	: $K_D=280$	$n=1.93$ ($\psi < 10$)
野田 ²⁹⁾	: $K_D=240$	$n=1.67$
都田 ³⁰⁾	: $K_D=60$	$n=1.5$

図23

図24

(2) 臨界速度 V_{cr} , 最小水力勾配 $i_{\min}$ ³¹⁾

$$i = \frac{\lambda_w V_m^2}{2gD} \left[1 + C_v K_D \left\{ \frac{V_m^2 \sqrt{C_D}}{gD(S-1)} \right\}^{-n} \right] \quad (55)$$

$$di/dV_m = 0 \quad V_m = V_{cr}$$

$$V_{cr} = \left[(n-1) C_v K_D \left\{ \frac{\sqrt{C_D}}{gD(S-1)} \right\}^{-n} \right]^{1/2n} \quad (56)$$

$$i_{\min} = \frac{\lambda_w V_{cr}^2}{2gD} \left[1 + C_v K_D \left\{ \frac{V_{cr}^2 \sqrt{C_D}}{gD(S-1)} \right\}^{-n} \right] \quad (57)$$

数値計算例: (図25)

$D=0.05$ m, $n=1.5$, $K_D=200$, $S=2.6$, $C_D=0.5$, $\lambda_w=0.02$

図25

図26

$$\mu_s = 0.8 F_{rm}^{-0.2} \quad (62)$$

数値解析および実験結果との比較

(図26, 図27, 図28, 図29, 図30)

5.2 擬塑性流体

- (1) 水力勾配 i および圧力損失係数 $\phi^{32)}$

$$i = i_f(1 + C_V \phi) \quad (58)$$

$$\phi = \frac{i - i_f}{i_f C_V} \sim F_{rm} = \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} \cdot F_r \quad (59)$$

$$\phi_{th} = \frac{2}{\lambda_f} \frac{\mu_s}{F_r^2} \frac{\gamma_s - \gamma_f}{\gamma_f} \frac{1}{\zeta} = \frac{2}{\lambda_f} \frac{\mu_s}{F_{rm}} \frac{1}{\zeta} \quad (60)$$

$$\phi_{ex} = \frac{2}{\lambda_f} F_{rm}^{-1.25} \quad (61)$$

図27

- (2) 臨界レイノルズ数 $N_{RePC}^{33)}$

$$N_{RePC} = \frac{2240(2n+1)(3n+2)}{(3n+1)^2} \quad (26)$$

- (3) 臨界速度 (限界速度)³⁴⁾

$$\frac{di}{dV_m} = \frac{di_f}{dV_m}(1 + C_V \phi) + i_f C_V \frac{d\phi}{dV_m} = 0 \quad (63)$$

$$\lambda_P = 4f_P = \frac{a}{N_{ReP}^b} = \frac{0.14n + 0.176}{N_{ReP}^{0.25n - 0.2}} \quad (64)$$

(36)式より得られる値の近似式。

N_{ReP} は(34)式による。

図29

$$i_f = \frac{(0.14n + 0.176)}{\left(\frac{\rho D^n}{\mu \rho}\right)^{0.25n - 0.2}} \frac{V_m^{\frac{8n^{0.2} - 2 + n}{4n^{0.2}}}}{2gD} \quad (65)$$

$$\phi = \frac{2}{\lambda_f} F_{rm}^{-1.25} \quad (61)$$

$$\frac{di}{dV_m} = \frac{0.14n + 0.176}{\left(\frac{\rho D^n}{\mu_P}\right)^{\frac{1}{4n^{0.2}}}} \cdot \frac{8n^{0.2} - 2 + n}{4n^{0.2}} \cdot \frac{V_m^{\frac{4n^{0.2} - 2 + n}{4n^{0.2}}}}{2gD}$$

$$-\left\{gD\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_f}-1\right)\right\}^{1.25} C_V \frac{V_m^{-3/2}}{2gD} \quad (62)$$

$$V_{mc} = \left\{ \frac{4n^{0.2} C_V}{(0.14n + 0.176)(8n^{0.2} - 2 + n)} \right\}^{\frac{4n^{0.2}}{(10n^{0.2} - 2 + n)}} \cdot \left(\frac{\rho D^n}{\mu p} \right)^{\frac{1}{(10n^{0.2} - 2 + n)}} \cdot \left\{ g D \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_f} - 1 \right) \right\}^{\frac{5n^{0.2}}{(10n^{0.2} - 2 + n)}} \quad (63)$$

(63)式より得られる V_{mc} を用い, (65)式および(61)

図32 石炭輸送用パイプライン（アメリカ）

表1 世界のスラリー輸送実施例

輸送対象物	場 所		距 離 (km)	管 径 (inch)	輸 送 量 (10 ⁶ ton/年)	稼動開始
	地 名	国 名				
石 炭	Nowo Wolynsk	U.S.S.R.	61	12	1.80	1950
	Lorraine	France	9	15	1.50	1952
	Ohio	U.S.A.	174	10	1.25	1957
	Black Mesa	U.S.A.	440	18	4.80	1970
石 灰 石		Trinidad	10	8	0.6	1959
	Rugby	England	91	10	1.7	1964
	Calaveras, Cali.	U.S.A.	27	7	1.5	1971
		U.S.A.	14	5	0.35	
銅 精 鉱	Bougainville	New Guinea	27	6	1.0	1972
	West Irian	Indonesia	112	4	0.3	1972
	Pinto Valley, Arizona	U.S.A.	18	4	0.4	1974
		Turkey	61	5	1.0	
鉄 精 鉱	Savage River, Tasmania	Australia	85	9	2.5	1967
	Pena Colorado	Mexico	48	8	1.8	1974
磁 鉄 鉱	Waipipi	New (land)	6	8	1.0	1971
		Zealand (off shore)	3	12	1.0	
磷 鉱 石	Tampa, Florida	U.S.A.	2~3	16	6.0(採掘量)	
金選鉱滓		South Africa	35	6 and 9	1.05	
銅選鉱滓	秋 田	日 本	68	12	0.6	1969
ニッケル鉱滓	Western Mining	U.S.A.	7	4	0.1	1970
ギルソナイト カ オ リ ン	Utah	U.S.A.	115	6	0.38	1957
	Georgia	U.S.A.	26	8	0.6	
廃 棄 物 (ウェイト)	Ohio	U.S.A.	21	12		

6. む す び

式よりそれぞれ求められる i および ϕ を用い, (58) 式によって i を計算する。

数値計算と実験結果との比較 (図31)。

5.3 ビンガム流体

ビンガム流体に対しても擬塑性流体と同じような考え方により実験結果を整理することができる。

プラント内のスラリー輸送

鉱産資源等の長距離スラリー輸送 (表1)³⁵⁾

土砂等のスラリー輸送 (表2)³⁴⁾

アメリカにおける石炭の長距離スラリー輸送計画³⁶⁾

(表3, 図32)

非ニュートン流体の流動特性等の研究の必要性

(特に, 非均質流れに対して)

表2 我国のスラリー輸送の実施例

輸送対象物		プロジェクトの名称(場所)	距離 (km)	管外径 (mm)	輸送量 ($10^6 \text{ m}^3/\text{年}$)	稼動開始
土 砂	山 土	(1) 鹿児島与次郎ヶ浜埋立工事(鹿児島市)	6.8 ~ 7.8	585(内径)	4.3	1967.2
		(2) 鹿児島祇園洲公有水面埋立工事(鹿児島市)	2.7	267.4	0.65	1974.2
	浚 渫	(3) 鹿児島港外港航路浚渫工事(茨城県)	1.0 ~ 6.5	786	5.4	1972.8
		(4) 金沢地先埋立工事(横浜港)	2.4 ~ 2.7	786	3.0	1974.9
		(5) 谷山1号用地埋立工事(鹿児島)	1.6 ~ 2.2	786	8.3	1975.2
		(6) 東播磨港(別府地区)-7.5M泊地浚渫工事(加古川)	2.5	786	0.96	1975.5
		(7) シンガポールチャンギー地区土地造成工事	1.1 ~ 2.9	786	5.0	1976.5
泥	土	(8) 印旛沼干拓事業(千葉県)	11.5	350(内径)	0.75	1957
		(9) 幌向客土輸送(北海道幌向)	0.2 ~ 6.6	250	0.37	1958
		(10) 国営赤川農業水利事業(秋田県赤川)	0.75 ~ 1.0	200	0.45	1969.9
鉾	滓	(11) 大館鉾滓ライン(秋田県)	68.1	318.5	0.3	1969.1

表 3

パイプライン名	Black Mesa	Alton		Texas Eastern	Florida-Georgia
		(1)	(2)		
ライン長さ km	440	122(9)	296(34)	2.340	76
標 高 差 m	~370	~450	~450	—	—
管 経 mm	450	300(250)	520(500)	950	—
比 重	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41
濃 度(重) %	50	—	—	—	—
平均流速 m/s	1.8	—	—	—	—
輸 送 量 t/h	660	—	—	—	—
// 万t/年	480	250	910	2500	5500
稼 動 年	1970	1980 1982	1980 1982	1982	1986

文 献

- Skelland A.H.P.: Non-Newtonian Flow and Heat Transfer, 13, (1967), (John Wiley & Sons. Inc.).
- McMillen: Chem. Eng. Prog., 44, (7), 537, (1948).
- 川島, 野田ら: 東北鉾山, 13, (3・4), 69~70, (1966).
- 川島: 選炭, 17, (92), 380~381, (1967).
- 川島: 化学工業, 12, (3), 13, (1968).
- 川島, 益山: 日本鉾業会誌, 85, (978), 864~867, (1969).
- Hanks, R.W.: A.I.Ch.E.J., 9, (1), 45, (1963).
- Hanks, R.W.: A.I.Ch.E.J., 9, (3), 306, (1963).
- 益山, 川島: 日機論, 43 (373), 3320~3326, (1977).
- Metzner A.R. and Reed J.C.: A.I.Ch.E.J., 1, (4), 434, (1955).
- Nikuradse J.: VDI-Forsch.h., 356, 1, (1932).
- Prandtl L.: VDI-Z. 77, (5), 105, (1933).
- van Driest E. R.: J. Aeron. Sci., 23, 1007, (1956).
- Hanks R.W. and Ricks B.L.: J. Hydronautics, 9, (1), 39, (1975).
- 益山, 川島: 日機論, 44, (381), 1590, (1978).
- 同 上: 同上, 44, (381), 1591~1593, (1978).
- 益山, 川島ら: 日本鉾業会, 春季大会研究発表講演会, 343~344, (1979). 日本鉾業会誌, 投稿中.
- van Driest E. R.: 前出 13), 1007~1011.
- Hanks R.W. and Dadia B.H.: A.I. Ch. E.J., 17, (3), 554~557 (1971).
- Hanks R.W.: Hydrotransport 5, C2-23~34, (1978).
- 益山, 川島ら: 前出 17).
- 日本機械学会: 技術資料, 管路・ダクトの流体抵抗, (川島, 野田分担執筆), 179~180, (1979).
- Condoliis E. and Chaups E.: Chem. Eng., 8, 131 ~138, (1963).
- Koch L.: International Sci. Technology, 26, 68~78, (1964).
- Babcock H.: Chem. Eng. Review, 60, (48), 36~45, (1964).
- Bonnington S.: Brit. Hydromechanics Res. Assoc., TN 708, (1961).
- Ellis H. and Round G.: Canad. Min. Metall. Bull.,

- 56, (10), 773~781, (1963).
- 28) Zandi I. and Govatos G.: Proc. Amer. Soc. Civil Engrs., 93, (HY3), 145~159, (1967).
- 29) 野田：日本鉱業会，秋季大会分科研究会資料，L-6, (1973).
- 30) 都田，今野，斎藤，前田：化学工学，33 (1)，67, 1969.
- 31) スラリー輸送研究会：スラリー輸送システム実用化技術資料集，(川島分担執筆)，119~121, (1974).
- 32) 益山，川島，野田：Hydrotransport 5, D1-1~14, (1978).
- 33) 益山，川島：前出 9)，3322.
- 34) 益山，川島，野田：日本鉱業会誌，95, (1096), 343~347, (1979).
- 35) 運輸省：報告 (1979-3).
- 36) STA：STA Report, 4, (3), (1979-4).